

(19)日本国特許庁 (JP)

(12) 公開特許公報 (A)

(11)特許出願公開番号

特開平6-147985

(43)公開日 平成6年(1994)5月27日

(51)Int.Cl.⁵
G 0 1 J 4/04
G 0 1 B 9/02
G 0 1 N 21/41
G 0 2 F 1/01

識別記号 庁内整理番号
Z 9215-2G
Z 7370-2J

F I

技術表示箇所

審査請求 未請求 請求項の数3(全8頁)

(21)出願番号 特願平4-294551

(22)出願日 平成4年(1992)11月2日

(71)出願人 000004226

日本電信電話株式会社

東京都千代田区内幸町一丁目1番6号

(72)発明者 高橋 亮

東京都千代田区内幸町一丁目1番6号 日

本電信電話株式会社内

(72)発明者 香川 俊明

東京都千代田区内幸町一丁目1番6号 日

本電信電話株式会社内

(72)発明者 岩村 英俊

東京都千代田区内幸町一丁目1番6号 日

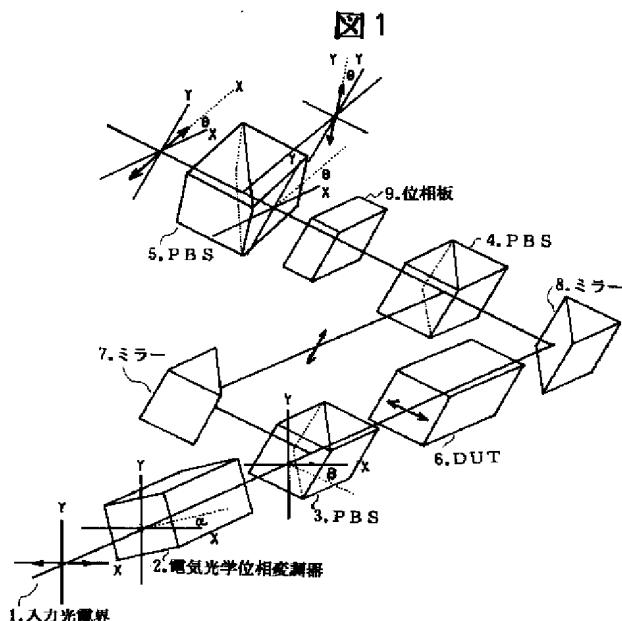
本電信電話株式会社内

(74)代理人 弁理士 秋田 収喜

(54)【発明の名称】複素屈折率測定方法及びその装置

(57)【要約】

【目的】 任意の波長における屈折率変化を測定する。
【構成】 電気光学位相変調器と、マッハツエンダー干渉計と、波長板と、偏光ビームスプリッターと、受光素子と、を備えるものであって、前記電気光学位相変調器を用いたプローブ光に変調周波数 ω_m の偏光変調、かつ被測定信号に変調周波数 ω_s の強度変調をかけ、半波長板により位相を反転させた信号光電界と反転させない信号光電界を合成し、かつ変調により生じる様々な周波数の信号成分 $\omega_m + \omega_s$ と ω_m もしくは $2\omega_m + \omega_s$ と $2\omega_m$ の比をとる。



【特許請求の範囲】

【請求項1】 電気光学位相変調器と、マッハツェンダ干渉計と、波長板と、偏光ビームスプリッターと、受光素子と、を備えるものであって、

前記電気光学位相変調器を用いたプローブ光に変調周波数 ω_m の偏光変調、かつ被測定信号に変調周波数 ω_s の強度変調をかけ、半波長板により位相を反転させた信号光電界と反転させない信号光電界を合成し、かつ変調により生じる様々な周波数の信号成分 $\omega_m + \omega_s$ と ω_m もしくは $2\omega_m + \omega_s$ と $2\omega_m$ の比をとることを特徴とする複素屈折率測定方法。

【請求項2】 電気光学位相変調器と、マッハツェンダ干渉計と、波長板と、偏光ビームスプリッターと、受光素子と、を備えるものであって、前記電気光学位相変調器を用いたプローブ光に変調周波数 ω_m の偏光変調、かつ被測定信号に変調周波数 ω_s の強度変調をかける手段と、半波長板により位相を反転させた信号光電界と反転させない信号光電界を合成し、かつ変調により生じる様々な周波数の信号成分 $\omega_m + \omega_s$ と ω_m もしくは $2\omega_m + \omega_s$ と $2\omega_m$ の比をとる手段とを備えたことを特徴とする複素屈折率測定装置。

$$E_p = E_0 g e^{i(\omega t + \tau)} \quad \dots \quad (1)$$

【0006】で表される。そして、被測定試料3の複素屈折率をポンプ光のチョッピング等により、

$$g = g_0 + \frac{\Delta g}{2} (1 + s \sin \omega_s t) \quad \dots \quad (2)$$

【0008】のように変調させると、プローブ光パワーの変調信号成分は、

$$P_{sig} = |E_0|^2 g \Delta g s \sin \omega_s t \quad \dots \quad (3)$$

【0010】となり、利得変化に比例する信号を得ることができる。

【0011】しかし、このような構成からなる複素屈折率測定方法では、被測定試料3内で生じる位相変化、すなわち屈折率変化の情報を得ることはできないものとなっている。

【0012】図4は、従来のマッハツェンダ干渉計を示すものであり、この干渉計を用いた測定によって位相

$$P = \frac{E_0^2}{2} (1 + g^2 + 2 g s \sin \gamma) \quad \dots \quad (4)$$

【0016】となる。そして、被測定信号に変調を与えると、位相変化はマッハツェンダ干渉計のミラー間の揺らぎによる雑音を含め、次式のように書き表される。◆

$$\gamma = \frac{\gamma_0}{2} (1 + s \sin \omega_s t) + n = \frac{\gamma_0}{2} s \sin \omega_s t + \left(\frac{\gamma_0}{2} + n \right) = \gamma' + n' \quad \dots \quad (5)$$

【0018】これにより、変調信号成分は次式で表され*50*ことになる。

* 【請求項3】 偏光ビームスプリッターは、プローブ光の電界の方向に対して45°に傾けてなることを特徴とする請求項2記載の複素屈折率測定装置。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【産業上の利用分野】 本発明は、複素屈折率測定方法及びその装置に係り、特に、マッハツェンダ干渉計と、波長板と、偏光ビームスプリッターと、受光素子と、を備える複素屈折率測定方法及びその装置に関する。

10 【0002】

【従来の技術】 従来の複素屈折率測定方法としては次のようなものが知られていた。

【0003】まず、図3に、被測定試料の利得（吸収）の動的変化を測定する測定系を示している。同図において、1はプローブ光、2は受光素子、3は被測定試料である。

【0004】このような構成において、被測定試料3内で生じる変化を $g e^{i\tau}$ とすると、試料通過後のプローブ光電界は、

20 【0005】

【数1】

※【0007】

※【数2】

★【0009】

★30【数3】

☆変化の情報を得ることができるようになっている。
【0013】同図において、1はプローブ光、2及び3はハーフミラー、4及び5は全反射ミラー、6は被測定試料、7は受光素子、8は $\lambda/4$ 波長板である。

【0014】このような構成における、出力光パワーは、

【0015】

【数4】

◆【0017】

【数5】

【0019】

* * 【数6】

$$P_{\text{sig}} = \left[\left(g_0 + \frac{\Delta g}{2} \right) \cos n' \gamma_0 + g_0 \Delta g \right] \sin \omega_{\text{st}} \quad \dots \dots \dots (6)$$

【0020】しかし、この(6)式は、位相変化と利得変化の信号が混在されたものであり、位相変化 γ_0 に比例する信号を得るには、 Δg が0である必要がある。

【0021】このため、従来では、プローブ光波長を試料に対し完全に透明な領域に設定し、被測定試料の屈折率変化を得るようにしていた。

【0022】

【発明が解決しようとする課題】しかしながら、このように構成されたマッハツエンダー干渉計を用いて、複屈折率の変化を得るために、上述のように、プローブ光波長を試料に対し完全に透明な領域に設定する必要があるために、任意の波長における屈折率変化を測定することはできないという問題点が残されていた。

【0023】また、ミラー間の揺らぎはプローブ光の波長に対し無視できないものとなっており、それが雑音として信号に付加されるため、高感度な測定は期待できないという問題点が残されていた。

【0024】本発明は、このような事情に基づいてなされたものであり、その目的とするところのものは、任意の波長における屈折率変化を測定できる複素屈折率測定方法及びその装置を提供することにある。

【0025】本発明の他の目的は、任意の波長における屈折率変化の測定を雑音なく高感度に行なうことのできる複素屈折率測定装置を提供することにある。

【0026】

【課題を解決するための手段】このような目的を達成するために、本発明による複素屈折率測定方法は、基本的には、電気光学位相変調器と、マッハツエンダー干渉計と、波長板と、偏光ビームスプリッターと、受光素子と、を備えるものであって、前記電気光学位相変調器を用いたプローブ光に変調周波数 ω_m の偏光変調、かつ被測定信号に変調周波数 ω_s の強度変調をかけ、半波長板により位相を反転させた信号光電界と反転させない信号光電界を合成し、かつ変調により生じる様々な周波数の信号成分 $\omega_m + \omega_s$ と ω_m もしくは $2\omega_m + \omega_s$ と $2\omega_m$ の比をとることを特徴とするものである。

※40

$$\vec{E}_{\text{out}}(X') = R(-\theta)R(\beta)M(1, \xi)M(g, \gamma)R(-\beta)R(\alpha)M(1, \Gamma)R(-\alpha)\vec{E}_{\text{in}}(Y) \quad \dots \dots \dots (7)$$

$$R(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}$$

$$M(a, b) = \begin{bmatrix} a e^{ib} & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

【0036】ここで、 γ, Γ, ξ はそれぞれ、DUT、電気光学位相変調器、位相板で生じるリターデーション、 g はDUTでの電界利得である。

【0037】そして、いま、入力プローブ光電界を、 ★50

★【0038】

【数8】

$$\vec{E}_{\text{in}}(Y) = E_0 e^{i\omega t} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad \dots \dots \dots (8)$$

5

【0039】とすると、X'、Y'方向の光強度は、 r * 【0040】
及び Γ に依存しない項は無視するとして、それぞれ次式
のようになる。* 【数9】

$$\begin{aligned} 2|\vec{E}_{\text{out}}(X')|^2/E_0^2 = & -g \sin 2\alpha \sin 2\Phi \sin 2\Psi \cos \Gamma \cos(\gamma + \xi) \\ & + g \sin 2\alpha \sin 2\Psi \sin \Gamma \sin(\gamma + \xi) \\ & - g \cos 2\alpha \cos 2\Phi \sin 2\Psi \cos(\gamma + \xi) \\ & + \sin 2\alpha \cos 2\Phi \cos^2 \Psi \cos \Gamma (G - \tan^2 \Psi) \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (9)$$

【0041】

$$|\vec{E}_{\text{out}}(Y')|^2 = -|\vec{E}_{\text{out}}(X')|^2 \quad \dots\dots\dots (10)$$

【0042】ここで、 $\Phi = \alpha - \beta - \pi/4$ 、 $\Psi = \beta - \theta$
のようにして置換してある。

【0043】電気光学位相変調器内での位相差には、温度変化による複屈折揺らぎや駆動電圧の揺らぎによる雑音Nが重畠されているとし、

【0044】

【数11】

$$\Gamma = \Gamma_m \sin \omega_m t + N \quad \dots\dots\dots (11) \quad 20$$

★【0045】とする。

【0046】さらに、被測定試料の複素屈折率はポンプ光のチョッピング等により変調させると、マッハツエンダー干渉計のミラー間の揺らぎによる雑音を含め、次式のように書き表される。

【0047】

【数12】

$$g = g_0 + \frac{\Delta g}{2} (1 + \sin \omega_s t) \quad \dots\dots\dots (12, 1)$$

$$\gamma = \frac{\gamma_0}{2} (1 + \sin \omega_s t) + n = \frac{\gamma_0}{2} \sin \omega_s t + \left(\frac{\gamma_0}{2} + n \right) = \gamma' + n' \quad \dots\dots\dots (12, 2)$$

【0048】このようなことを前提として、次に、図2を用いて複素屈折率測定装置の一実施例を説明する。

【0049】同図において、1は入射プローブ光、2は電気光学位相変調器、3～8は偏光ビームスプリッタ一、9は被測定試料、10～12は全反射ミラー、13～15は可変ミラー、16～18はそれぞれ $\pi/4$ 、 $\lambda/2$ 、 $-\lambda/4$ 波長板、19～26は受光素子、27、☆

$$\begin{aligned} 2|\vec{E}_{\text{sig}}(X')|^2/E_0^2 = & [g \{ \cos N \cos n' - 2\Phi \sin N \sin n' \} \sin(\gamma + \xi) \\ & + g \{ \cos N \sin n' + 2\Phi \sin N \cos n' \} \cos(\gamma + \xi) \\ & + \frac{1}{2} (g^2 - 1) \sin N] 2J_1(\Gamma_m) \sin \omega_m t \\ & + [g \{ \sin N \cos n' + 2\Phi \cos N \sin n' \} \sin(\gamma + \xi) \\ & + g \{ \sin N \sin n' - 2\Phi \cos N \cos n' \} \cos(\gamma + \xi) \\ & + \frac{1}{2} (g^2 - 1) \cos N] 2J_2(\Gamma_m) \sin 2\omega_m t \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (13)$$

【0051】となる。ここでは、 $\Phi \ll 1$ として、 $\cos 2\Phi = 1$ 、 $\sin 2\Phi = 2\Phi$ のようにして置換してある。

【0052】ここで、 $\xi = 0$ 、 $\pm \pi/2$ 、 π の4通りに對して、 ω_m 、 $\omega_m + \omega_s$ 、 $2\omega_m + \omega_s$ 、 $2\omega_m$ の周波数成◆

☆28は差動増幅器、29、30は加算増幅器である。ここで、 $\alpha \rightarrow \pi/4$ 、 $\Phi \rightarrow 0$ 、 $\Psi \rightarrow \pi/4$ となるように各素子の角度を設定し、(11)、(12)式を(9)式に代入し、ベッセル関数で展開し、 ω_m 、 $\omega_m + \omega_s$ 、 $2\omega_m + \omega_s$ 、 $2\omega_m$ の周波数成分のみに着目すると、

【0050】

【数13】

◆分を考える。なお、 Φ は十分0に近いとして、 Φ の項は無視するものとする。

【0053】(i) $\xi = 0$ のとき、

【0054】

【数14】

$$P_{\text{sig}}(\omega_m) = [(g_0 + \frac{\Delta g}{2}) \cos N \sin n' + \frac{1}{2}(g_0^2 - 1) \sin N] J_1(\Gamma_m) \cos(\omega_m)t \quad \dots (14,1)$$

$$\begin{aligned} P_{\text{sig}}(\omega_m + \omega_s) = \\ [\frac{\gamma}{2}(g_0 + \frac{\Delta g}{2}) \cos N \cos n' + \frac{\Delta g}{2} \cos N \sin n' + g_0 \Delta g \sin N] J_1(\Gamma_m) \cos(\omega_m + \omega_s)t \end{aligned} \quad \dots (14,2)$$

$$\begin{aligned} P_{\text{sig}}(2\omega_m + \omega_s) = \\ [\frac{\gamma}{2}(g_0 + \frac{\Delta g}{2}) \sin N \cos n' + \frac{\Delta g}{2} \sin N \sin n' + g_0 \Delta g \cos N] J_2(\Gamma_m) \cos(2\omega_m + \omega_s)t \end{aligned} \quad \dots (14,3)$$

$$\begin{aligned} P_{\text{sig}}(2\omega_m) = \\ [(g_0 + \frac{\Delta g}{2}) \sin N \sin n' + \frac{1}{2}(g_0^2 - 1) \cos N] J_2(\Gamma_m) \cos(2\omega_m)t \end{aligned} \quad \dots (14,4)$$

【0055】(ii) $\xi = \pi / 2$ のとき

* 【数15】

【0056】

*

$$P_{\text{sig}}(\omega_m) = [(g_0 + \frac{\Delta g}{2}) \cos N \cos n' + \frac{1}{2}(g_0^2 - 1) \sin N] J_1(\Gamma_m) \cos(\omega_m)t \quad \dots (15,1)$$

$$\begin{aligned} P_{\text{sig}}(\omega_m + \omega_s) = \\ [-\frac{\gamma}{2}(g_0 + \frac{\Delta g}{2}) \cos N \sin n' + \frac{\Delta g}{2} \cos N \cos n' + g_0 \Delta g \sin N] J_1(\Gamma_m) \cos(\omega_m + \omega_s)t \end{aligned} \quad \dots (15,2)$$

$$\begin{aligned} P_{\text{sig}}(2\omega_m + \omega_s) = \\ [-\frac{\gamma}{2}(g_0 + \frac{\Delta g}{2}) \sin N \sin n' + \frac{\Delta g}{2} \sin N \cos n' + g_0 \Delta g \cos N] J_2(\Gamma_m) \cos(2\omega_m + \omega_s)t \end{aligned} \quad \dots (15,3)$$

$$P_{\text{sig}}(2\omega_m) = [(g_0 + \frac{\Delta g}{2}) \sin N \cos n' + \frac{1}{2}(g_0^2 - 1) \cos N] J_2(\Gamma_m) \cos(2\omega_m)t \quad \dots (15,4)$$

【0057】(iii) $\xi = \pi$ のとき、

* 【数16】

【0058】

*

$$P_{\text{sig}}(\omega_m) = \left[-\left(g_0 + \frac{\Delta g}{2}\right) \cos N \sin n' + \frac{1}{2}(g_0^2 - 1) \sin N \right] J_1(\Gamma_m) \cos(\omega_m)t \dots (16,1)$$

$$\begin{aligned} P_{\text{sig}}(\omega_m + \omega_s) &= \\ \left[\frac{-\gamma}{2} \left(g_0 + \frac{\Delta g}{2}\right) \cos N \cos n' - \frac{\Delta g}{2} \cos N \sin n' + g_0 \Delta g \sin N \right] J_1(\Gamma_m) \cos(\omega_m + \omega_s)t \end{aligned} \dots (16,2)$$

$$\begin{aligned} P_{\text{sig}}(2\omega_m + \omega_s) &= \\ \left[\frac{-\gamma}{2} \left(g_0 + \frac{\Delta g}{2}\right) \sin N \cos n' - \frac{\Delta g}{2} \sin N \sin n' + g_0 \Delta g \cos N \right] J_2(\Gamma_m) \cos(2\omega_m + \omega_s)t \end{aligned} \dots (16,3)$$

$$P_{\text{sig}}(2\omega_m) = \left[-\left(g_0 + \frac{\Delta g}{2}\right) \sin N \sin n' + \frac{1}{2}(g_0^2 - 1) \cos N \right] J_2(\Gamma_m) \cos(2\omega_m)t \dots (16,4)$$

【0059】(iv) $\xi = -\pi/2$ のとき

* 【数17】

【0060】*

$$P_{\text{sig}}(\omega_m) = \left[-\left(g_0 + \frac{\Delta g}{2}\right) \cos N \cos n' + \frac{1}{2}(g_0^2 - 1) \sin N \right] J_1(\Gamma_m) \cos(\omega_m)t \dots (17,1)$$

$$\begin{aligned} P_{\text{sig}}(\omega_m + \omega_s) &= \\ \left[\frac{\gamma}{2} \left(g_0 + \frac{\Delta g}{2}\right) \cos N \sin n' - \frac{\Delta g}{2} \cos N \cos n' + g_0 \Delta g \sin N \right] J_1(\Gamma_m) \cos(\omega_m + \omega_s)t \end{aligned} \dots (17,2)$$

$$\begin{aligned} P_{\text{sig}}(2\omega_m + \omega_s) &= \\ \left[\frac{\gamma}{2} \left(g_0 + \frac{\Delta g}{2}\right) \sin N \sin n' - \frac{\Delta g}{2} \sin N \cos n' + g_0 \Delta g \cos N \right] J_2(\Gamma_m) \cos(2\omega_m + \omega_s)t \end{aligned} \dots (17,3)$$

$$P_{\text{sig}}(2\omega_m) = \left[-\left(g_0 + \frac{\Delta g}{2}\right) \sin N \cos n' + \frac{1}{2}(g_0^2 - 1) \cos N \right] J_2(\Gamma_m) \cos(2\omega_m)t \dots (17,4)$$

【0061】次に、以上の式を基に必要な信号を作り出すことを考える。以下では、 $\gamma, \Delta g, N, n' \ll 1$ であることを考慮して、信号に対して微小な項は無視するものとする。まず、(13, 2) 式と (15, 2) 式

※式、及び (14, 1) 式と (16, 1) 式の差動増幅により、

【0062】

【数18】

$$P_{\text{sig}}(\omega_m + \omega_s) = \left[\gamma_0 \left(g_0 + \frac{\Delta g}{2}\right) \cos N \cos n' \right] J_1(\Gamma_m) \cos(\omega_m + \omega_s) \dots (18,1)$$

$$P_{\text{sig}}(\omega_m) = \left[2 \left(g_0 + \frac{\Delta g}{2}\right) \cos N \cos n' \right] J_1(\Gamma_m) \cos(\omega_m) \dots (18,2)$$

11

【0063】が得られる。よってこれらの信号をロックイン検波して、それらの信号の比をとれば、装置内に存在する様々な雑音N, n' や利得変化△gに擾乱を受けることなく極めて高感度に、位相変化量γ₀を測定する *

$$\frac{\gamma_0}{2} = \frac{\int P_{\text{sig}}(\omega_m + \omega_s) \cos(\omega_m + \omega_s)t dt}{\int P_{\text{sig}}(\omega_m) \cos \omega_m t dt} \quad \dots (19)$$

【0066】更に、(14, 3)式と(16, 3)式、 * 【0067】
及び(13, 4)式と(15, 4)式の和をとれば、 * 【数20】

$$P_{\text{sig}}(2\omega_m + \omega_s) = g_0 \Delta g \cos N J_2(\Gamma_m) \cos(2\omega_m + \omega_s)t = \frac{\Delta G}{2} \cos N J_2(\Gamma_m) \cos(2\omega_m + \omega_s)t \quad \dots (20,1)$$

$$P_{\text{sig}}(2\omega_m) = \frac{1}{2}(G-1) \cos N J_2(\Gamma_m) \cos 2\omega_m t \quad \dots (20,2)$$

【0068】が得られることになる。(19, 1)式の信号をロックイン検波すれば利得変化を得ることが可能であるが、雑音Nが問題となる場合は、同様に(19, 2)式のロックイン信号との比をとれば、雑音に影響を★

★受けることなく相対的利得変化の高感度測定が可能となる。すなわち、
【0069】
【数21】

$$\frac{\Delta G}{G-1} = \frac{\int P_{\text{sig}}(2\omega_m + \omega_s) \cos(2\omega_m + \omega_s)t dt}{\int P_{\text{sig}}(2\omega_m) \cos 2\omega_m t dt} \quad \dots (21)$$

【0070】となる。

【0071】以上示したように、上記実施例で示した複素屈折率測定方法によれば、電気光学位相変調器および被測定信号に異なる周波数の変調を与え、それによって生じる各種周波数の信号成分を、異なる波長板通過後に解析するようになっている。

【0072】すなわち、該解析は、複素屈折率の実部と虚部を独立にかつ同時に測定できることになる。

【0073】したがって、任意の波長における屈折率変化を測定でき、しかも、被測定試料内で生じる利得の変化をも同時にかつ分離して測定することができる。

【0074】さらに、偏光ビームスプリッターをプローブ光の電界の方向に対して45°に傾けることにより、雑音は該偏光ビームスプリッターによって遮断できることから、高感度の測定を達成することができるようにな☆50

★る。

【0075】

【発明の効果】以上説明したことから明らかなように、本発明による複素屈折率測定方法及びその装置によれば、任意の波長における屈折率変化を測定できるようになる。

【0076】また、任意の波長における屈折率変化の測定を極めて高感度に行なうことができるようになる。

【図面の簡単な説明】

【図1】 本発明による複素屈折率測定方法及びその装置の一般的光学系配置を示す説明図である。

【図2】 本発明による複素屈折率測定方法及びその装置の一実施例の構成を示す説明図である。

【図3】 従来の利得変化の測定系の一例を示す構成図である。

13

【図4】 従来の屈折率変化の測定系の一例を示す構成図である。

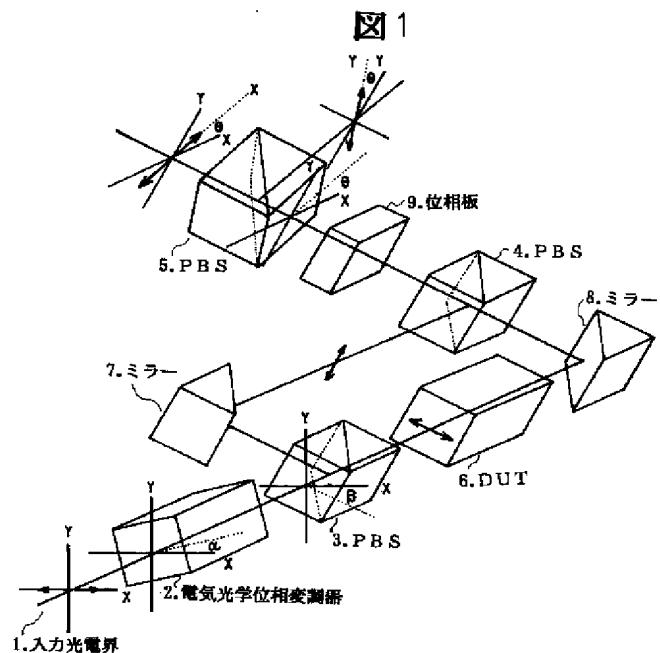
【符号の説明】

1…プローブ光、2…電気光学位相変調器、3～8…偏

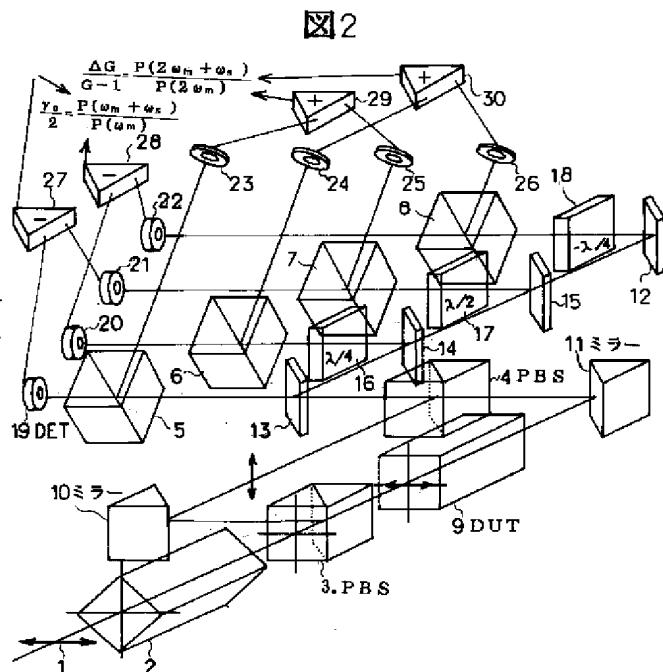
14

光ビームスプリッター、9…被測定試料、10～11…全反射ミラー、12～15…ハーフミラー、16～18…波長板、19～26…受光素子、27～30…作動増幅器。

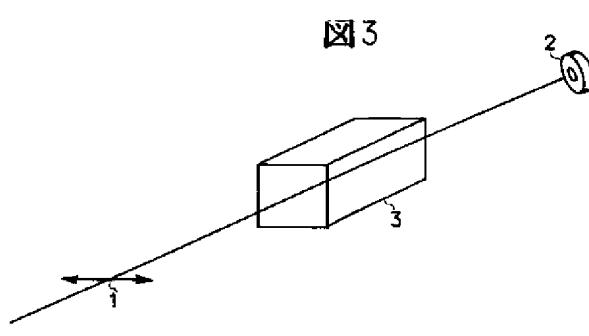
【図1】



【図2】



【図3】



【図4】

